

Raimund Ubar – sündinud 16. detsembril 1941 Tallinnas. 1966 lõpetas Tallinna Polütehnilise Instituudi automaatika ja telemehaanika erialal, tehnikakandidaat (1971), tehnikadoktor (1986), Eesti Teaduste Akadeemia akadeemik arvutitehnika alal (1993), TTÜ arvutitehnika kateedri juhataja (1987-1992), TTÜ elektroonika kompetentsuskeskuse asutaja ja selle juhataja (1993-1997), TTÜ professor alates 1992, Eesti Teadusfondi Nõukogu esimees (1993–1997), Eesti Teadus- ja Arendusnõukogu liige (1993-1997), Presidendi juures asuva Akadeemilise Nõukogu liige (1994-1996), Balti Tehnoloogiateaduste Akadeemia asutajaliige (1992-1994), Euroopa Testi Tehnoloogia Tehnilise Komitee liige (alates 1995), töötanud pikemat aega Saksamaa, Rootsi, Prantsusmaa ja Itaalia ülikoolides, juhendanud 7 europrojekti programmide TEMPUS, COPERNICUS ja ESPRIT raames, avaldanud üle 250 publikatsiooni teaduslikel ja teaduspoliitilistel teemadel.

Elektroonikadisaini uued paradigmad

Maailm on muutumas. Informatsioonivahetus ja kommunikatsioon globaalsel tasandil - see on uus aspekt inseneritöös.

OECD¹ on ennustanud, et aastaks 2000 kujuneb elektroonika võtmetehnoloogiaks peaaegu igal tööstusalal maailmas. Autoelektroonika, meditsiiniseadmed, automatiseeritud konveierid ja tooteliinid tööstuses, telekommunikatsioonisüsteemid, personaalsed digitaal-assistendid, rääkimata olmeelektroonika peadpöörivast arengust - need on vaid mõned näited elektroonika juurdumisest meie ellu. Toodete kasvav “intelligentsuse” tase, kompaktsus, üliväike energiatarve, madalad projekteerimis-, tootmis- ja testimiskulud - see on efekt, mida elektroonika loob.

Aastal 1992 moodustas maailma elektroonikatoodang kümneendiku kogu maakera GNP-st (rahvuslikust koguproduktist). Iga-aastane kasvutempo elektroonikas on suurem kui mistahes teises valdkonnas. Integraalskeemide ehk elektroonikakomponentide turg kasvab aastas 15%. Seejuures on huvitav märkida, et saja juhtiva elektroonikafirma kasvutempo samal ajal langeb, mis räägib sellest, et elektroonikas suureneb väikeettevõtete roll. Määravaks uute toodete turule viimisel on saanud konkurentsivõimelise idee olemasolu. Levinud on stsenaarium, kus ülikooli seinte vahel sündinud idee baasil eraldub *alma mater*’ist nn. *spin-off* väikefirma, kes produtseerib toote ja viib selle turule. Globaliseerunud elektroonikatööstus tähendab seda, et mistahes väike disainifirma võib oma projekteeritud toote dokumentatsiooni (faili) saata interneti teel mistahes ränikööri suvalises maailmapunktis, kus vaid hetkel “konveier on vaba”, ja kus siis projekti järgi valmib integraalskeem - toode või toote komponent.

Revolutsiooniline pööre

Submikrontehnoloogias on saavutatud nii kõrget integratsiooniastet (vt. tabel²), et terve süsteemi realiseerimine kiibis (SOC-revolutsioon - *System-on-Chip*) muutub reaalsuseks. Sisuliselt tähendab see, et kui veel eile võis lugeda diskussiooni teemal “kas kasutada mikroprotsessorit või disainida ASIC³ - privaatmikroskeem” asjakohaseks, siis SOC-

¹ Organization for Economic Cooperation and Development

² Motorola Semiconductor Products Sector andmetel

³ Application Specific Integrated Circuit

tehnoloogia puhul on mikroprotsessor ise vaid integraalskeemi (ehk projekteeritava süsteemi) komponendiks, mistõttu ka diskussioon kaotab mõtte.

SOC-tehnoloogia tähendab integraalskeemide funktsionaalse keerukuse kasvu, ent turukonkurents juurdub ta ellu ikkagi vaid siis, kui disainide keerukuse kasvuga kaasneb ka projektide kiirem realiseeritavus - väiksem ajavahemik idee sünnist toote jõudmiseni turule (*time-to-market*).

Elektroonikasüsteemide projekteerimise metodoloogias ongi viimastel aastatel toimunud nihe keerukate süsteemikomponentide “taaskasutamise” (*reuse*) suunas, mis tähendab kord juba projekteeritud komponentide kasutamist teistes projekteeritavates süsteemides. Niisugused taaskasutatavad ehk *virtuaalsed* komponendid võivad kuuluda disainisüsteemide üldkasutatavatesse andmeteekidesse, aga nad võivad kujutada endast ka mingi konkreetse disainifirma intellektuaalset omandit (IO). Viimase kahe aasta jooksul ongi üldise tunnustatuse saanud keeruliste elektroonikakomponentide nn. IO-plokkide korduvkasutamise põhimõte.

	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Tehnoloogia (μm)	0,35	0,25	0,18	0,13	0,10	0,07
Ventiilide arv kiibis	5M	14M	26M	50M	210M	430M
Bittide arv kiibis						
- DRAM	64M	256M	1G	4G	16G	64G
- SRAM	16M	64M	256M	1G	4G	16G
Valmist.hind ($\\$/\text{cm}^2$)	\$3.90	\$3.80	\$3.70	\$3.60	\$3.50	
Kiibi suurus (mm^2)						
-	250	300	360	430	520	620
loogika/mikroprots.	190	280	420	640	960	1400
- DRAM						
Toitepinge (V)	2.5	1.8-2.5	0.9-1.8	0.9	0.9	0.9
Sisend/väljund. arv	750	1125	1700	2200	3000	4000
Töösagedus (MHz)	300	450	600	800	1000	1100

Eeskujud ja prognoosid

Arvutitarkvara tööstuses on tarkvara korduvkasutuse probleemi käsitletud juba mõnda aega. Statistikutel väitel nõuab tarkvara puhul koodi ettevalmistamine korduvkasutuseks 50% lisatööd võrreldes sellega, kui koodi kasutatakse vaid üks kord. Samal ajal aga efekt tarkvara korduvkasutusest olevat tervelt 70%⁴. Seetõttu, ehkki korduvkasutatava komponendi integreerimine ja testimine uues keskkonnas nõuab teatavaid kulutusi, on ometigi korduvkasutuse paradigma tarkvaraprojektides kindlalt juurdunud.

Riistvara ehk elektroonika valdkonnas on samasugune disainiparadigma aktuaalseks muutunud seoses disaini automatiseerimistaseme kasvuga, mis sisuliselt on viinud tarkvara ja riistvara projekteerimise meetodid üha suuremale lähenemisele. Kõrge insenerliku produktiivsuse saavutamiseks on elektroonikas kaks teed: uute funktsioonide efektiivsem implementeerimine ning olemasolevate lahenduste taaskasutamine. Uusdisaini produktiivsust ennustatakse kasvavat aastaks 2000 kuni 2 korda,

⁴ D. Bouldin. Developments in Design Reuse. “Microelectronics Systems News”. July 1998. (<http://www-ece.engr.utk.edu>).

korduvkasutuse produktiivsus suurenevat aga koguni 12 korda. Disainitsükkel peaks seejuures kahanema 15%, tiimi suurus kasvama 36% ja korduvkasutuse osa disainis tõusma 53%⁵.

Piraatluse ohud

Probleemiks tänapäeva elektroonikatööstuses on virtuaalsetes komponentides sisalduva intellektuaalse omandi kaitse. Teema on “kuum”, sest keerukate IO-komponentide väärtus on hakanud järsult tõusma, aga kallid hinnad ahvatlevad teadagi vargusele. Kõige levinumateks kaitsevahenditeks on koodide krüpteerimine, juriidiline kaitse, “vesimärkide” kasutamine, kuid kõigil neil on teatavad puudused. Koodide krüpteerimine pole IO tarbija jaoks mugav, sest süsteemide silumisel ja disainivigade otsimisel on sageli vaja jälgida ka IO-ploki sisemist käitumist. Nn. “tagauste” avamine usaldusalustele (klientidele - IO kasutajatele) mittekrüpteeritud failide kasutamiseks tekitab aga ohu infolekkele, mille tulemuseks võib olla IO-komponendi illegaalne pöördprojekteerimine (*reverse engineering*)⁶. Veel problemaatilisem on lugu siis, kui IO-plokk ise sisaldab vigu. Üheks lahenduseks võiks olla komponendi varustamine piiratud arvu “vaatlusportidega”, mis teevad komponendi töö mõnevõrra jälgitavaks, aga mitte sedavõrd, et avaneks võimalus pöördprojekteerimiseks.

Juriidilised IO kaitse vahendid pole tegelikult mõeldud mitte niivõrd kaitseks kui just hirmutamiseks. Juriidiline kaitse hakkab toimima alles siis, kui piraatlus on juba aset leidnud. Piraatluse tõestamiseks kasutatakse harilikult nn. “vesimärke” koodis - lisatakse teatavaid objekte, millel pole midagi ühist koodi funktsiooniga. Vesimärgi tehnikana näiteks kartograafias on kasutatud fiktiivse linna lisamist maakaardile. Disaini koodi vesimärgistamise näiteks võiks olla krüpteeritud disaini numbri lisamine koodi, nii et iga klient saaks mingi kindla seerianumbri. See võimaldaks ka lokaliseerida kohta, kust piraatkoopid on alguse saanud. Meetod on haavatav, kui piraadid on võimelised “lahti muukima” vesimärgi ideed.

Tee üle vaevamägede

Ehkki komponentide taaskasutamise mõte tundub olevat triviaalne ja loomulik, toimub selle ellurakendumine elektroonika projekteerimisel üsnagi vaevaliselt. Paljudel disainifirmadel on traditsiooniks esitada interneti kodulehekülgedel firmas loodud IO-komponentide nimekirju demonstreerimaks firma kompetentsust ning disainialaseid kogemusi. Kuid seejuures nad peaaegu kunagi ei taaskasuta ise oma tooteid ilma uuenduste sisseviimiseta, rääkimata sellest, et mõni teine firma olles avastanud mõne reklaamitud toote seda kohe ka kasutada sooviks. Primitiivne legoideoloogia “võta ja ühenda” ei taha siin hästi realiseeruda. Ometigi just selline ongi eesmärk - muuta integraalskeemide projekteerimine sarnaseks komponentide jootmisele trükkplaadil.

On aga ka palju tuntud firmasid nagu LSI Logic, Motorola, Alcatel, IBM, Synopsys jt., kes omavad juba ammu IO-plokkide andmeteeke, mida firmas realiseeritavates projektides korduvalt kasutatakse. Näiteks Synopsys töötas välja juba 1992. a. komponentide teegi korduvkasutuse eesmärgil, mis sisaldas summaatoreid, multipleksereid ja teisi lihtsamaid plokkide, ning mis sai aluseks keerukamate IO-plokkide

⁵ System Chip Letter. VSI Alliance. Issue 2, Summer 1998 (<http://www.vsi.org>)

⁶ A.Toomsalu. Integraallülituste pöördprojekteerimine. AA 2'98.

projekteerimisel. Firmasisesest IO-komponentide korduvkasutust soosivad juriidiliste barjääride puudumine, ühtne dokumenteerimise standard, vahetu kontaktivõimalus komponendi disaineriga ning ligipääs kasutatud disainivahenditele, aga samuti võimalus valmistada komponenti firmasiseselt. Klientidelt väljaspool firmat, kes sooviksid kasutada firma IO-plokke, nõutakse harilikult, et ka terve kiip valmistataks selles firmas, kellele kuulub IO. Kliendile pole see aga atraktiivne, kuna tootelt sadav kasum võib niiviisi väheneda. Taoline aheldatus pärsib IO vastastikkust kasutamist elektroonikatööstuses.

Esimesed katsed kasutada vastastikku IO-komponente realiseerusid peamiselt bilateraalse koöperatsiooni teel, tugeva strateegilise partnerluse alusel. Enamasti polnud need katsed edukad. Näiteks 1995. aastal tegi Synopsys katse saata turule oma disainitud PCI-ploki⁷ üldiseks kasutamiseks, aga loobus siiski peagi selle toote levitamisest, kuna liiga palju tuli kulutada energiat ning kohapealset teenustööd komponendi integreerimisel erinevatesse keskkondadesse.

Mida Juku ei õpi, seda Juhan ei tea

Esimese IO-plokkide generatsiooni läbikukkumine tõi esile huvitava tähelepaneku. IO pakkujad, kes enamasti olid ka disainivahendite loojad, avastasid, et IO-komponendid erinevad suuresti disainitarkvarast. Traditsiooniliselt nõutakse disainitarkvaralt küll “viimase peal” olevaid algoritme, et sünteesida võimalikult kiiresti võimalikult suuri ja võimalikult kiireid disaine. Tarkvara kvaliteeti ja kasutamise hõlpsust peetakse seejuures teisejärguliseks, sest klient eelistab pigem omal jõul mõningatest puudustest üle saada, kui vaid tarkvara võimalikult kiiresti tema valdusse tuleks. IO-plokkide puhul on lugu teine - vajakajäämine kvaliteedis tähendab, et projekteeritav süsteem ei hakka lihtsalt tööle, ja kui IO-ploki kasutamine liialt keeruliseks osutub, on kliendil lihtsam see ise projekteerida.

Põhiprobleemideks IO-plokkide korduvkasutamise katsetel osutusid: dokumentatsiooni mittestandardiseeritus, kvaliteedi garantii puudumine, probleemid intellektuaalse omandi kaitsel jms.

IO-komponentide korduvkasutusel rajanev projekteerimise uus paradigma esitas nõude kõige tihedamaks koostööks nii süsteemiprojekterijate (IO tarbijate), komponentide disainerite (IO pakkujate), integraalskeemide valmistajate kui ka disainitarkvara loojate vahel. Seejuures piir komponendi ja süsteemi vahel on sageli suhteline, mis tähendab seda, et koostööpartnerite rollid võivad kattuda - süsteemi projekterijast saab IO pakkuja ja komponendi disainerist saab IO tarbija. Teisest küljest aga polnud koostöö mõeldav ilma standarditeta keelte (VHDL, C, Verilog, SDL), liideste (VSI - *Virtual Socket Interface*), simuleerimisvahendite ja testimisstrateegiate osas.

Ärkamisaeg

Äärmine vajadus leida väljapääs ummikust IO kasutamisel teadvustus kiiresti. 1996. a. sügisel ühines sadakond elektroonikafirmat liiduks VSI⁸ Alliance, kes kujunes initsiaatoriks standardite ja instruksioonide väljatöötamisel erinevatest allikatest pärinevate IO-komponentide integreerimisel. VSI Alliance'i tekkimist toetas ka IO

⁷ Peripheral Components Interface

⁸ Virtual Socket Interface

tootjatest-firmadest koosnev kutseassotsiatsioon RAPID⁹, kelle põhifunktsiooniks oli kaasabi ning toetus IO-toodete levikule elektroonikatööstuses. Eesmärgiks seati ülemaailmsete IO-võrkude (IO-magistraalide) ja andmebaaside loomine, mis soodustaksid süsteemitaseme makrode, tuumade ja megakomponentide levikut süsteemidisainerite hulgas. Olulise rolli peaksid siin haarama uuelaadilised IO vahendamisele orienteeruvad maaklerfirmad, kes üheltpoolt vahendaksid disainerit, kes otsib IO-d ja teiselt poolt, firmasid, kes oleksid võimelised rahuldama IO tarbijat. Maakleri rolliks oleks info kogumine IO komponentide kohta, selle levitamine IO vajajatele ning kaasabi IO kasutamise seotud tehniliste ja juriidiliste probleemide lahendamisel.

Möödunud aastal loodi Grenoble'i Rahvusvahelise Polütehnilise Instituudi juures Prantsusmaal andmebaas virtuaalsete komponentide vahendamiseks interneti kaudu¹⁰. Instituudi juures asutatud *spin-off* firma Design & Reuse haldab ja arendab seda andmebaasi, millesse hetkel kuulub juba üle 1500 IO-komponendi. Firma ettevõtmist on toetanud Euroopa Liit programmi ESPRIT raames, aga sponsoriteks on ka niisugused laialt tuntud firmad nagu Siemens, Philips, SGS Thomson, Xilinx Inc., Thomson Multimedia, Bosh, Bull, Alcatel, Aptix, Synthesia, France Telecom jt.

Eesti elektroonika globaalses kaubamajas

Intellektuaalse omandi andmebaasi kasutades saavad disainerid otsustada, kas hakata ise uut komponenti projekteerima või pöörduda vastava firma poole litsentsi saamiseks ning vajaliku komponendi faili hankimiseks interneti kaudu. R&D andmebaasi loomine on esimeseks sammuks internetile baseeruva nn. globaalse "disainimaja" tekkimisele. Andmebaas võimaldab disainide kohta saada üksikasjalist teavet, näiteks kus ja millises tehnoloogias on komponenti juba kasutatud ning millised on olnud tulemused (retsensioonide ja hinnangute loetelu). Firmat R&D võib mõnes mõttes vaadelda "kaubamajana", kus toode pole küll letil, aga seisab valmistaja juures "laos" ning ootab klienti-ostjat. Pääsenud andmebaasi, on IO-komponendist saanud sisuliselt kaup. Niisugusi IO-andmebaase - interneti "kaubamaju" - on peale tulemas teisi. Konkurentsis jäävad peale need, kes kvaliteetsemat ja usaldusväärsemat "kaupa" pakuvad. Seetõttu polegi nii lihtne andmebaasi pääseda - vastuvõtmise otsustab ekspertiisikomisjon, kes "kaubamaja" reputatsiooni eest vastutab.

TTÜ arvutitehnika instituudis projekteeriti hiljuti esimene ülisuur integraalskeem Eestis - krüptoprotsessor, mille prototüüpseeria valmistati Lääne-Euroopas, ja mis edukalt läbis eksperimentaalsed katsetused. Instituudis on tehtud veel teisi mikroelektroonika disaine mitmete välisprojektide raames partneritele Soomes ja Rootsis. Hiljuti läbisid kaks magister Jüri Põldre poolt projekteeritud mikroskeemi, nende hulgas ka nimetatud krüptoprotsessor, edukalt rahvusvahelise ekspertiisi ja nad lülitati R&D ülemaailmsesse mikroelektroonika IO-andmebaasi, mis on levitav interneti kaudu¹¹.

Väljakutse insenerkonnale

IO-paradigma võidukäik elektroonikas on sundinud firmasid tegema vastavaid

⁹ Reusable Application-Specific Intellectual Property Developers, <http://www.RAPID.org>

¹⁰ <http://www.design-reuse.com>

¹¹ R.Ubar. Eesti mikroelektroonika osaleb maailma virtuaalses kaubamajas. EP lisa "Uus meedia", Nr.3 (8), 12. veebr. 1998.

organisatoorseid ümberkujundusi. Näiteks Alcatel Microelectronics on asutanud uue osakonna Alcatel Design Factory, mille missiooniks on olla IO vahendaja nii firma sees kui ka väljaspoole firmat. Korrigeeritakse firmade koosseise, asetades suurema rõhu inseneride võimele süsteemselt mõelda võrreldes projekteerimiskogemustega traditsioonilise skeemitehnika tasemel. On saanud selgeks, et inseneride arvu suurendamine pole lahendus ja ka inseneride produktiivsuse tõstmisel on piirid. Firma edukuse võtmeks on uute võimaluste avastamine lisaväärtuse loomisel, milleks on näiteks "värske" IO lisamine toodetesse, selle produtseerimine või hankimine, haldamine ja kasutamine. On võetud omaks, et vaid avatud liides tagab konkurentsivõimelist ideed kandvale uuele IO-plokile piisava kestvusega eluea. Selle fakti alahindamine ongi põhjuseks, miks lootusrikkalt alustanud väikefirmad kaovad silmapiirilt tihti väga kiiresti.

Elektroonikas praegu aset leidev revolutsioon, mis seisneb SOC-tehnoloogia, IO-paradigma ja korduvkasutuse ideoloogia võidukäigus, tähendab sisuliselt väljakutset laiale insenerkonnale elektroonika ja arvutustehnika valdkonnas. Disainerid peavad teadma, et nende projektid, mis pole realiseeritud korduvkasutatavana, kaotavad mõtte. Süsteemide loojad peavad üle saama omaenese ego häirivast "*not invented here*"-sündroomist. Süsteemne mõtlemine elektroonikas, mis baseerub nii riistvara kui tarkvara (*SW/HW codesign*) finesside täiuslikul valdamisel, on saanud vältimatuks. Aga insener, kes valdaksid niisuguse süsteemse mõtlemise vajalikku taset, on tänapäeval raske leida. Vahest siit tulebki otsida vastust paradoksile elektroonikatööstuses, kus firmad hädaldades üheltpoolt suure tööjõupuuduse üle vallandavad samal ajal massiliselt kvalifitseeritud oskustöölisi ja insenere (tänavu juba üle 120 tuhande¹²).

Prioriteediks saab haridus

Ülal kirjeldatud revolutsiooniline situatsioon tähendab seda, et ka insenerihariduse süsteem vajab ümberkorraldamist. Mikroelektroonika areng on kiirem, kui seda on ennustatud. Milliseks kujunevad 0,07 µm tiheduse juures mikroskeemide arhitektuurid, millised peaksid olema niisuguste arhitektuuride automaatse sünteesi vahendid, seda ei kujutata praegu veel hästi ettegi. Seega, mitte uute tööriistade väljamõtlemine pole praegu elektroonikas prioriteet, vaid uue põlvkonna inseneride hariduskontseptsiooni kujundamine. Selle põlvkonna ette seatakse lahendamiseks küsimus, kuidas projekteerida 10 aasta pärast infosüsteemide arhitektuure. Vajadus investeerida uude inseneride põlvkonda on hariduspoliitikute poolt suuresti allahinnatud. Mitte *riistvarasse* ega *tarkvarasse* ei tule investeerida, sest mõlemad vananevad moraalselt kahe-kolme aastaga, vaid *inimvarasse*.

Paradigma muutumine süsteemide projekteerimisel toimub meie silme all. Ränist on saamas meedium, kus süsteemide projekteerimise tervikparadigmas sulanduvad raadiosagedus, analoog-digitaal-liides, riistvara-protssessor ning reaalaaja tarkvara, selleks et tuua võrguteenuseid vahetult kätte tarbijale. Niisugune projekt nõuab insenerilt multidistsiplinaarset loovat ja süsteemset mõtlemist. Viimane saab kujuneda üksnes tudengite ning õppejõudude ühises uurimis- ja arendustöös reaalsete interdistsiplinaarsete projektide raames, sellest saadava kogemuse üldistamises ja formaliseerimises

¹² J. Robertson. Wanted: Skills and savings. Electronic Buyers News. July 1998
(<http://www.ebnonline.com>)

meetoditena, andmeteekidena ja tarkvaratööriistadena. See tähendaks veelgi tihedamat õppe ja teadustöö sulandumist, aga eelkõige - kommunikatsioonilõhede kaotamist arvutustehnika, elektroonika, sidetehnika ja informaatika valdkondade vahel. See tähendaks ka suurema rõhu panemist tudengi iseseisvale tööle laboris ning selleks vajalike võimaluste tagamist kaasaegsete töökeskkondade loomise teel.

Raimund Ubar

10. aug. 1998